

УДК 621.735.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.167077

Моделювання техпроцесу кування труб без оправки

О. Є. Марков, О. В. Герасименко, А. С. Хващинский, Р. Ю. Житніков,
Р. Г. Пузир

Досліджено спосіб протягування товстостінних труб. Запропонований спосіб полягає в деформуванні пустотілої заготовки без оправки. Розроблено методику проведення теоретичних досліджень МСЕ. Методика призначена для визначення теплового, деформованого стану та формозміни заготовки при куванні труб без використання оправки. Змінними параметрами були внутрішній діаметр пустотілої заготовки, який варіювався в інтервалі 0.30; 0.55; 0.80. На основі скінчено-елементного моделювання були встановлені: розподіл температур і інтенсивності логарифмічних деформацій в об'ємі труби після протягування без використання оправки. Визначався діаметр отвору труби, який утворюється при протягуванні даним способом. Встановлювалися залежності інтенсивності подовження і потовщення стінки труби. Був розроблений спеціальний показник для оцінювання подовження труби. Було визначено, що при збільшенні внутрішнього діаметру подовження труби збільшується та знижується інтенсивність зменшення отвору. Загальною залежністю змодельованих схем протягування є те, що величина подовження пустотілої заготовки несуттєво змінюється для різних ступенів обтискань при сталих відносних розмірах труби. Це дозволило встановити рекомендовану подачу для збільшення подовження пустотілої поковки та зменшення ступеня закриття отвору. Раціональна подача повинна складати $(0.05...0.15)D$. Результати скінчено-елементного моделювання перевірялися експериментальними дослідженнями на свинцевих зразках. Була запропонована методика експериментального моделювання. Встановлено, що при внутрішньому діаметрі заготовки $(0.5...0.6)D$, спостерігається максимум потовщення стінки. Встановлено, що результати з формозмінення заготовки, які отримані у теоретичному дослідженні МСЕ, на 9...14 % більше за експериментальні. Достовірність результатів теоретичного моделювання підтверджується даними експерименту зі зменшення внутрішнього діаметру труби. Різниця теоретичних результатів й експериментальних складає 9...12 %. Встановлені закономірності дають можливість визначати остаточний діаметр отвору труби. За результатами моделювання встановлено, що протягування трубних заготовок без оправки цілком можливе. Цей спосіб розширює можливості техпроцесів виготовлення трубних заготовок

Ключові слова: товстостінна труба, протягування без оправки, кування, заковування отвору, подовження заготовки, МСЕ, тепловий стан, деформований стан

1. Вступ

Пріоритетним завданням розвитку енергетичного машинобудування є зниження собівартості деталей та підвищення їх механічних властивостей [1–3]. До цих деталей належать товстостінні труби. Ці поковки необхідно виготовляти куванням на оправці. Однак товстостінні труби виготовляються з суцільних валів із використанням операції висвердлювання отвору [4]. В результаті збільшується час механічної обробки, підвищуються витрати металу і відбувається перерізання волокна. Це пов'язано з тим, що при довжині труб більш 4000 мм та діаметрі отвору менше 300 мм використання оправки під час протягування неможливо [5]. Тому проблема виготовлення заготовок товстостінних труб на сьогодні є актуальною, яка потребує всебічного аналізу та удосконалення [6].

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

У роботі [7] на основі використання енергетичного методу розроблена модель для встановлення осьової витяжки заготовки при деформуванні трубних заготовок на радіально-кувальних машинах. Авторами роботи визначено вплив обтискання та подачі пустотілої заготовки на силу та змінення профілю в меридіональному перерізі труби. Однак встановлена модель не дозволяє встановити поперечну деформацію металу при куванні, що потребує розв'язок задачі у 3D постановці.

У статті [8] запропоновано техпроцес кування труб, в якому отриману заготовку підігрівають і доштамповують. Використання додаткового штампового оснащення забезпечує умови, при яких метал заготовки плине в центральній частині.

У дослідженні [9] з використанням скінчено-елементного аналізу здійснили дослідження техпроцесу кування труб без використання ковальської оправки. На основі результатів моделювання встановлено, що розроблений техпроцес можна використовувати при незначній подачі заготовки в інструмент. Кування без використання ковальської оправки при значних осьових подачах підвищує рівень осьової сили, яка може призвести до утворення розривів.

На основі результатів роботи [10] встановлена тривимірна модель техпроцесу протягування труб з використанням оправки методом скінчених елементів (МСЕ) і проаналізовано деформований стан пустотілої заготовки при протягуванні. Доведена раціональність способу обтискання з чотирьох сторін трубної заготовки з внутрішньою оправкою. Визначено, що кут повороту пустотілої заготовки не оказує вирішального впливу на змінення форми виробу. Встановлено, що протягування труб з невеликим отвором із використанням оправки неможливе, що пояснюється викривленням тонкої оправки та складністю її витягування з поковки.

У роботі [11] експериментально досліджували способи радіального кування трубних заготовок. Досліджуваний спосіб передбачав удосконалення оснащення для можливості протягування не на молотах, а на гідравлічних

пресах. У роботі встановлена закономірність змінення стінки трубної заготовки при протягуванні.

У роботі [12] отримані результати, щодо протягування труб без використання ковальської оправки. Встановлено, що відсутність оправки сприяє зменшенню отвору і слабкому подовженню труби. Експериментальні дані способів протягування без використання оправки дозволили визначити, що утворювана різнотовщинність уздовж стінки труби складала близько 2 %. Однак у роботі відсутні данні щодо впливу форми та розмірів ковальських бойків на подовження труби при куванні без оправки.

У роботі [13] встановлювався вплив геометрії деформуючого інструменту на деформований та напружений стан у процесі кування труб на оправці. Встановлено, що для виготовлення пустотілої поковки із максимальною рівномірністю розподілу інтенсивностей деформацій та механічних характеристик уздовж стінки труби доцільно використовувати деформуючий інструмент з випуклою поверхнею. За результатами експериментального моделювання способу кування труб на радіально-кувальних машинах встановлено, що досліджуваний процес дає можливість збільшити міцність і в'язкість металу [14]. Автором роботи встановлена залежність для визначення осової, радіальної та окружної деформації заготовки. Визначено вплив обтискання на технологічні режими протягування з використанням оправки. Однак у роботах [13, 14] не встановлено вплив способу деформування на утворення текстури, що збільшує анізотропію механічних характеристик матеріалу.

У роботі [15] моделювались способи радіального кування трубних заготовок з використанням оправки. За результатами експериментального моделювання були виготовлені труби з різними діаметрами та стінками. Автори здійснювали деформування чотирма бойками, це сприяло направленню течії металу заготовки уздовж осі, що дозволило знизити розширення у процесі кування.

У процесі кування трубних заготовок досліджувався вплив форми бойків для визначення проковування осової частини злитка [16]. За результатами дослідження встановлено, що отримати рівномірні механічні характеристики у поперечному та поздовжньому напрямках можливо при удосконаленні форми бойків.

Підвищення точності розмірів зовнішньої та внутрішньої частин металевих труб після кування з використанням оправки представлено у роботі [17]. Авторами роботи встановлено, що при збільшенні кута вирізних бойків відбувається підвищення рівномірності розподілу деформацій. Збільшення обтискання сприяє збільшенню точності отвору труби, але це збільшення може призвести до тріщиноутворення.

У роботі [18] досліджували вплив розподілу ліквації заготовки при куванні, що дозволило уточнити режими термічної обробки. Автори розробили програму для дослідження процесу деформування труб.

У дослідженнях [19, 20] порівнюються процеси кування труб трьома та двома бойками без використання оправки. В результаті досліджень

встановлено, що у процесі протягування двома ковальськими бойками більш інтенсивно утворюються дефекти на поверхні, ніж при протягуванні трьома бойками [21–23]. Встановлено, що зусилля кування двома бойками більше, ніж трьома. Деформації в тілі заготовок при куванні труб трьома бойками розподіляються рівномірно. Однак такий спосіб кування труб не можна використовувати для виготовлення довгомірних труб.

Аналіз літератури дозволив визначити, що проблема виготовлення товстостінних труб на сьогодні остаточно не вирішена. Найпрогресивнішими методами визначені способи протягування без використання оправки. Але НДС та формозмінення отвору труби у процесі протягування без використання оправки не встановлені. Тому потрібно удосконалити та дослідити процеси протягування труб без використання оправки. Розробка нових техпроцесів кування труб без використання ковальської оправки потребує проведення комплексного моделювання і розробки рекомендацій для їх реалізації.

3. Мета і задачі дослідження

Мета роботи – розробка процесу кування товстостінних труб без використання ковальської оправки для зменшення часу та витрат металу при механічній обробці труб відповідального призначення.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні задачі:

- розробити методику теоретичних та експериментальних досліджень процесів кування труб без оправки;
- встановити тепловий, деформований стан та визначити вплив внутрішнього діаметру трубної заготовки на змінення довжини труби при куванні без оправки та визначити закономірності зміни відносної товщини стінки трубної заготовки при куванні без використання оправки;
- провести перевірку даних скінчено-елементного моделювання зміни форми заготовки при протягуванні без використання оправки лабораторними експериментами.

4. Методика моделювання процесів протягування трубних поковок без використання ковальської оправки

4.1. Теоретичне моделювання формозміни, теплового стану та розподілу деформацій

Моделювання зміни форми, теплового стану заготовки та деформованого при куванні без використання оправки реалізувалося на основі МСЕ з використанням програмного продукту Deform 3D. В якості матеріалу обрана сталь 40Х, температурний інтервал обробки тиском 1180...790 °С. Коефіцієнт Пуассона приймався 0,3, модуль пружності Юнга першого роду 2×10^5 МПа. Температура нагріву заготовки $t=1180$ °С, швидкість руху деформуючого інструмента $v=30$ мм/с; діаметр труби $D=1,0$ м. Внутрішній діаметр у відносному співвідношенні (d_0/D) дорівнював 0.30, 0.55, 0.80. Схема процесу деформування наведена на рис. 1.

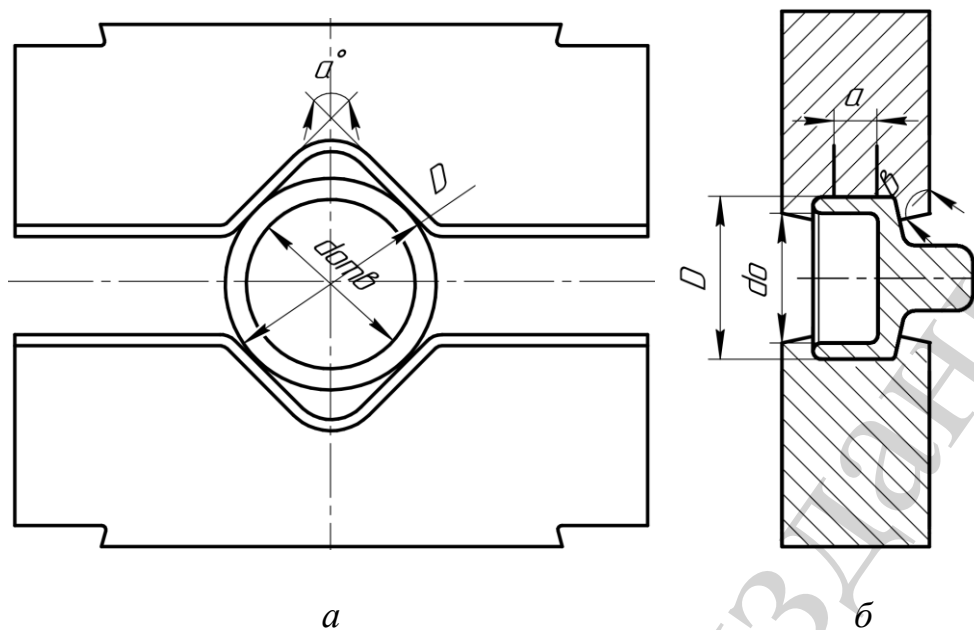


Рис. 1. Розрахункова схема кування без використання ковальської оправки:
а – вид спереду; *б* – вид збоку

Довжина пустотілих злитків варіювалась у діапазоні 288, 330 та 480 мм. Для кантування та утримання заготовки при деформуванні була призначена технологічна цапфа, що потребувало використання трубних заготовок із дном (рис. 1).

4. 2. Методика експериментального моделювання

Експериментальне дослідження процесу кування труб проводилося на свинцевих зразках. У свинець додався 1.0 % сурми, що наблизило реологічні властивості матеріалу до сталі 40Х при температурі гарячої обробки тиском. Зовнішній діаметр заготовок склав 50 мм, висота 24 мм, внутрішній діаметр пустотілої заготовки варіювався у діапазоні 12,25; 22,5; 35 мм, подача становила 10 % від діаметру (D), масштабний коефіцієнт склав 1:20. Пустотілі свинцеві зразки виготовлялися литтям у форму. Паралельність деформуючого інструменту забезпечувалась штамповим пакетом (рис. 2). Деформування проводилось до зовнішнього діаметру 26 мм. У процесі експериментальних досліджень вимірювалися розміри отвору труби.

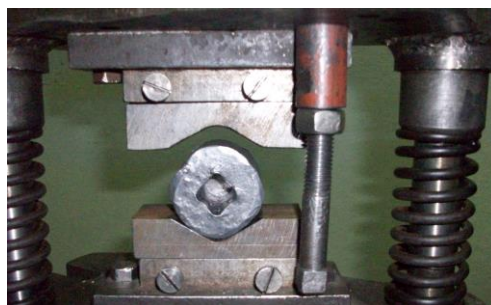


Рис. 2. Оснащення для експериментального моделювання

Кування проводилося на гідропресі силою 0.5 МН. Швидкість руху інструменту складала 1,5 мм/с, що відповідало кінематичним умовам подібності. При деформуванні вимірювалися розміри моделей та зусилля кування при протягуванні з обтисканням 5 %. Проводилися заміри об'єму порожнини поковки з використанням мірного волюметра. За глибиною та об'ємом порожнини визначався діаметр отвору труби після протягування без використання ковальської оправки.

5. Результати теоретичного моделювання теплового, деформованого стану та формозмінення заготовки при протягуванні без оправки

Був удосконалений техпроцес деформування труб без використання ковальської оправки, яка передбачала операції прошивання та протягування. Остаточне протягування заготовок проводиться без використання оправки. На сьогодні даний метод є малодослідженим, крім цього, немає рекомендації для впровадження цього способу кування.

Зміна форми трубних заготовок при деформуванні без використання ковальської оправки залежить від деформованого стану (ДС). ДС залежить від форми та розмірів деформуючого інструменту та параметрів деформування. Процес протягування труб без використання оправки реалізується зі збільшенням стінки труби. Тому для визначення закономірностей змінення внутрішнього діаметру трубної заготовки слід дослідити вплив протягування труб бойками з вирізами.

Для точного встановлення ДС слід визначити розподіл температур поковки при куванні. Розподіл температур після деформування дозволить визначити потрібну кількість підігрівів. Розподіл температур у заготовці визначався МСЕ.

Аналіз даних розподілу температур у тілі заготовки після деформування на 20 % визначив, що перепад температур за об'ємом відповідає температурному діапазону деформування сталі 40Х для досліджуваних розмірів труби (рис. 3). Середній перепад температур в об'ємі поковки становить 350 °С. В результаті кількість нагрівів у порівнянні з базовою технологією знизилась з двох до одного нагріву. Встановлені результати можна пояснити тим, що при деформуванні без використання оправки не відбувається відвід теплової енергії у бік охолоджувальної оправки, як при базовому способі кування. В результаті розширюються технічні можливості деформування трубних заготовок в наслідок збільшення кількості натискань за один нагрів.

При деформуванні змінюється поперечний переріз заготовки. При зростанні перерізу заготовки до деформації і при однаковому ступені обтискання довжина після деформування заготовки буде збільшуватися (згідно закону постійності об'єму).

Було проведено дослідження процесу деформування труб без використання оправки бойками з вирізом 115° та подачею 50 % від вихідного діаметру заготовки (рис. 4). Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що при деформуванні без використання оправки зменшується отвір труби (рис. 5). Зменшення внутрішнього діаметру складається зі збільшення стінки та зменшення зовнішнього діаметру.

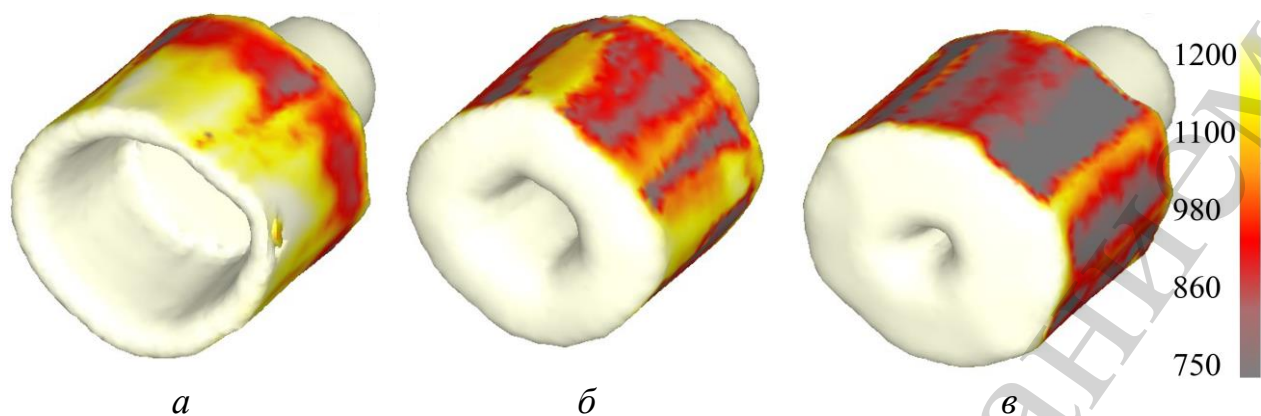


Рис. 3. Розподіл температур після кування без використання ковальської оправки для різних внутрішніх діаметрів (d_0/D): $a - 0.80$; $b - 0.55$; $v - 0.30$

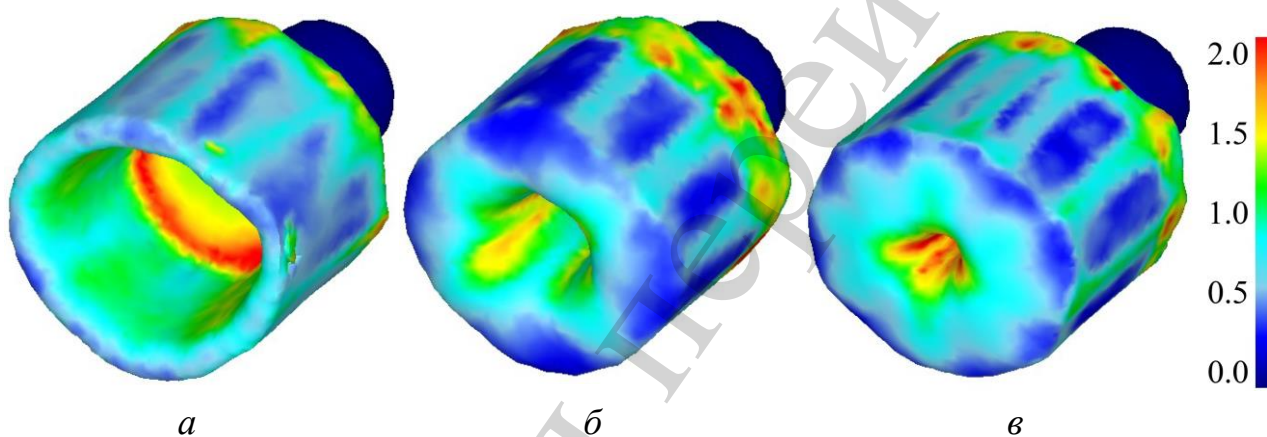


Рис. 4. Деформований стан після деформування без використання оправки для заготовок з внутрішнім діаметром (d_0/D): $a - 0.80$; $b - 0.55$; $v - 0.30$

При обтисканні заготовки з рівними зовнішніми діаметрами на однакову деформацію, зменшення внутрішнього діаметра визначається потовщенням стінки труби. При протягуванні без використання ковальської оправки визначено вплив внутрішнього діаметру заготовки (d_0/D) на її подовження (рис. 5). Визначено, що при збільшенні внутрішнього діаметру заготовки зростає поковочний внутрішній діаметр. Одночасно зменшується подовження заготовки (ψ).

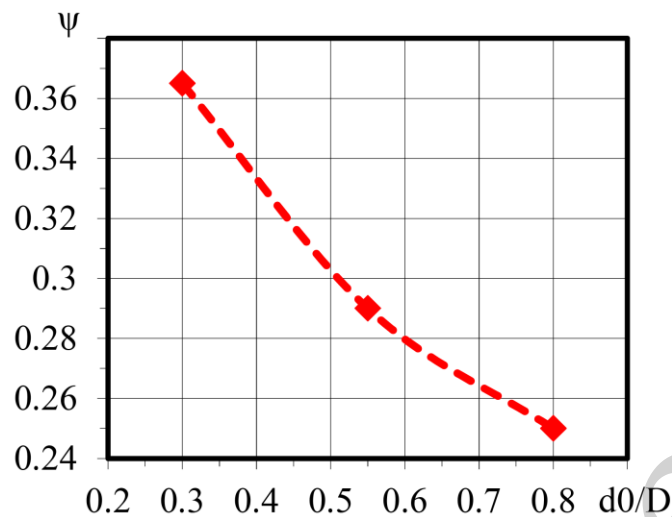


Рис. 5. Залежність подовження заготовки від відносного внутрішнього діаметра при обтисканні труби на 20 %

Змінення внутрішнього діаметру для різних розмірів заготовки, слід проводити на базі параметра, який враховує подовження. Цей параметр визначається відношенням різниці площ заготовки до деформації та поковки до площі, яка обтискається

$$f = \frac{F_0 - F_K}{F_{\text{обт}}} = \frac{(D^2 - d_0^2) - (D_K^2 - d_1^2)}{D^2 - D_K^2},$$

де F_0 , F_K – початкова та кінцева площа поперечного перерізу заготовки; $F_{\text{обт}}$ – площа поперечного перерізу заготовки, що обтискається; D , d_0 – зовнішній та внутрішній діаметри вихідної заготовки; D_K , d_1 – зовнішній та внутрішній діаметри поковки.

Запропонований показник дозволяє встановити подовження пустотілої заготовки при різній деформації трубної заготовки. Інакше кажучи цей параметр показує частину площі трубної заготовки що обтискається, яка спричинює подовження труби. Коли $f \rightarrow 0$ подовження труби не відбувається. Коли $f \rightarrow 1$ ($F_0 - F_K = F_{\text{обт}}$) вся зміна площі направлена на збільшення подовження труби.

Кування труб звичайними бойками не призводить до помітного подовження труби. Збільшення внутрішнього діаметру труби призводить до зменшення довжини. Це можна пояснити таким чином – при великих внутрішніх діаметрах (тонких стінках) метал буде текти у напрямку потовщення стінки поковки, ніж на збільшення її довжини. В результаті слід удосконалити спосіб протягування труб без використання ковальської оправки для збільшення довжини поковки.

6. Результати експериментального моделювання формозміни пустотілої поковки при куванні без використання оправки

Свинцеві моделі деформувалися бойками з вирізом 115° та подачею 10 %. Ці параметри були встановлені на основі результатів моделювання МСЕ як

раціональні для інтенсивного подовження при куванні. Протягування реалізовувалось проходами з деформацією по 5 % за кожний прохід. Деформування проводилося в такий послідовності: прохід по довжині → обертання заготовки на 90° → прохід по довжині → обертання заготовки на 90° → прохід по довжині → обертання заготовки на 45° → прохід по довжині. Така послідовність деформування забезпечує заготовці форму багатогранника, яка наближена до циліндричної. Для заданих режимів деформування у процесі деформування на поверхні не утворюються складки та відбувається максимальна течія металу здовж осі поковки.

Результати теоретичного дослідження порівнювалися з експериментальними даними. На рис. 6 представлено данні експериментального моделювання при деформуванні вирізними бойками заготовок з внутрішніми діаметрами (d_0/D) 0.80, 0.55, 0.30. Побудовані графічні залежності подовження труби (f) (рис. 7), потовщення її стінки (рис. 8) та змінення внутрішнього діаметру труби (d_{1cp}/D) (рис. 9).

Визначено, що при збільшенні внутрішнього діаметру подовження труби підвищується та знижується закриття отвору (рис. 7). Встановлені результати можна пояснити тонкою стінкою, яка забезпечує малий об'єм металу, тому менше металу тече в бік потовщення стінки.

Данні подовження трубної заготовки, які встановлені теоретичним моделюванням, на 8...14 % вище ніж данні експерименту (рис. 7). Крім того, збільшення товщини стінки інтенсивніше проходить для свинцевих зразків (рис. 8).



Рис. 6. Експериментальні пустотілі заготовки з різним внутрішнім діаметром (d_0/D) після деформування на 20%: а – 0.80; б – 0.55; в – 0.30

Експериментальні дослідження дозволили визначити (рис. 8), що при збільшенні внутрішнього діаметра трубної заготовки до 0.6 відбувається екстремальне потовщення її стінки. Внутрішній діаметр більш за 0.6 призводить до зменшення товщини стінки.

Данні МСЕ та експериментальні данні дозволили визначити екстремальне потовщення стінки, яке відбувається при відносному діаметрі 0.55...0.60 (рис. 8). Встановлено, що такі співвідношення розмірів трубної заготовки є неефективними при протягуванні без використання оправки, через інтенсивне потовщення стінки труби. Відхилення між теоретичними даними й експериментальними складає 5...7 %.

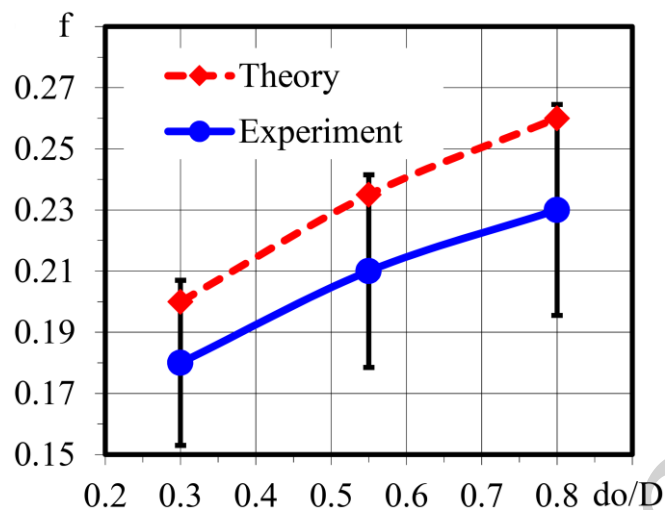


Рис. 7. Залежність подовження трубної заготовки від внутрішнього діаметра заготовки

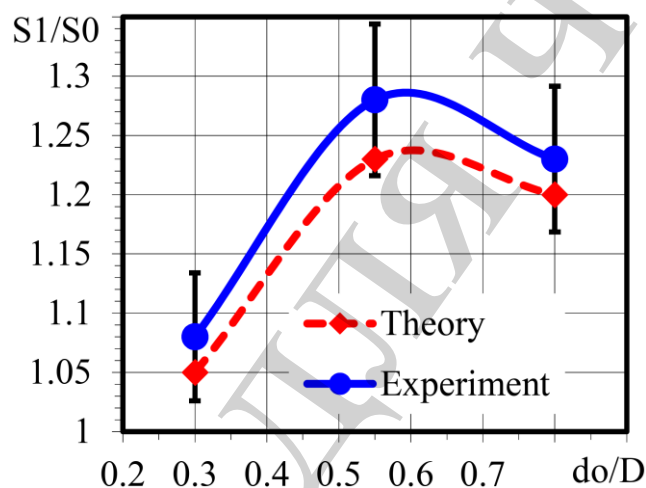


Рис. 8. Змінення товщини стінки труби в залежності від внутрішнього діаметру вихідної заготовки

Точність результатів моделювання МСЕ зі зменшення внутрішнього діаметру в залежності від внутрішнього діаметру заготовки (рис. 9) підтверджується експериментом. Різниця теоретичних результатів й експериментальних складає 9...12 %.

Виявлені закономірності аналогічні. Встановлені закономірності дають можливість визначити внутрішній поковочний діаметр труби. Збільшення внутрішнього діаметру вихідної заготовки призводить до збільшення внутрішнього діаметру поковки.

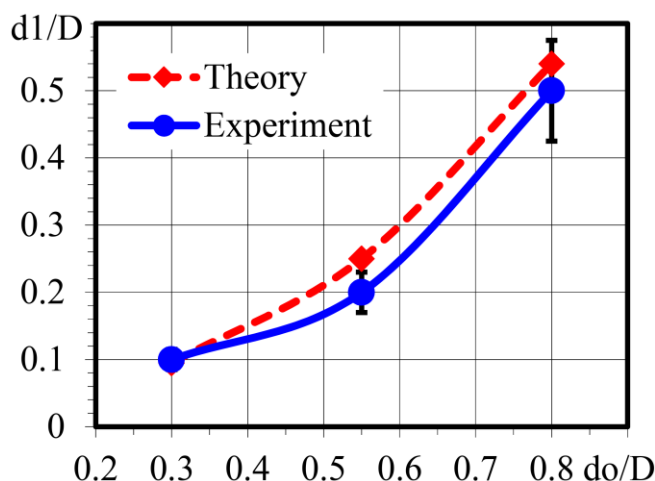


Рис. 9. Залежність зменшення внутрішнього діаметру від внутрішнього діаметру заготовки при деформуванні без використання оправки

7. Обговорення результатів виготовлення поковок труб без використання оправки

Розроблено новий спосіб протягування труб без використання оправки. Встановлено розподіл температур, деформацій та залежності зміни розмірів внутрішнього діаметру та потовщення стінки трубної заготовки при протягуванні без використання оправки. Одержані результати дозволили визначили раціональні геометричні параметри трубної заготовки до деформування без використання оправки, а також переваги перед існуючими способами протягування пустотілих виробів:

- удосконалено спосіб виготовлення товстостінних труб з внутрішнім діаметром менш 300 мм (труби надвисокого тиску, штанги бурових установок та ін.). Раніше такі вироби виготовлялись з суцільних заготовок свердленням. Це потребувало значного часу на механобробку та збільшення витрат металу;

- деформування труб без використання оправки дозволило зменшити кількість підігрівань заготовок за рахунок виключення охолодження, яке притаманне способу протягування на охолоджувальній оправці, що установлюється в отвір трубної заготовки. В результаті зменшується час деформування та витрати енергії на підігрівання заготовки;

- розроблений спосіб кування без використання ковальської оправки дозволяє не використовувати спеціальних оправок з жароміцної сталі;

- при деформуванні без використання оправки змінюється розподіл температур та деформацій трубної заготовки. В результаті при обтисканні метал тече не тільки у поздовжньому напрямку, але й поперек осі поковки;

- розроблено параметр подовження трубної заготовки, що визначає швидкість подовження трубної заготовки над швидкістю потовщення стінки, який дозволяє оцінити формозмінення заготовки при протягуванні без використання оправки.

До обмежень розробленого способу деформування товстостінних труб слід віднести:

– деформування без використання оправки призводить до течії металу поперек осі труби, що приводить до подовшення стінки та ускладнення керованості формозміни заготовки. Це потребує точно витримувати задані режими деформування;

– відсутність внутрішньої оправки потребує до збільшення припуску на внутрішній діаметр труби;

– запропонований спосіб протягування доцільно застосовувати тільки для виготовлення товстостінних труб.

Встановлені в роботі рекомендації по геометричним параметрам заготовок є значущими науково-практичними напрацюваннями, які можна використовувати в теорії та технології процесів деформування пустотілих виробів без використання оправки.

Практичним аспектом використання результатів моделювання є вдосконалення техпроцесу протягування труб з внутрішнім діаметром < 300 мм, коли застосування оправки неможливе.

Раніше досліджувалися процеси деформування трубних заготовок з використанням оправок. Протягування без використання оправок – це складний процес, але розширює технічні можливості деформування труб.

У роботі не представлені результати можливостей розробленого процесу виготовлення заготовок труб бойками спеціальної форми, які збільшать інтенсивність течії металу в осьовому напрямку для можливості виготовлення товстостінних труб. Тому не вирішеними питаннями залишаються визначення впливу форми та розмірів заготовки та форми деформуючого інструменту на підвищення подовження трубної заготовки при деформуванні без використання оправки.

8. Висновки

1. Визначено, що перепад температур в об'ємі поковки не перевищує за границі гарячої обробки тиском. Середній перепад температури в об'ємі поковки становить 350°C . В результаті кількості нагрівань при остаточному протягуванні у порівнянні з базовою технологією кування знизилась з 2 до 1 нагріву.

2. Визначено, що при збільшенні внутрішнього діаметру заготовки подовження збільшується та зменшується заковування отвору. Загальна залежність змодельованих процесів деформування – подовження відбувається незначно при різних рівнях деформування для фіксованих розмірів трубної заготовки. Це дозволило встановити рекомендовану подачу і зменшення заковування внутрішнього діаметру. Рациональна відносна подача для інтенсивної витяжки пустотілої заготовки складає $5...15\%$ від діаметру заготовки. При відносному внутрішньому діаметрі $0.55...0.60$ відбувається максимальне потовщення стінки поковки.

3. Результати подовження заготовки, які отримані моделюванням МСЕ, на $9...14\%$ більше за результати експерименту. Потовщення стінки швидше проходить при експерименті. Достовірність результатів теоретичного моделювання підтверджується експериментом зі зменшення внутрішнього діаметру в залежності від внутрішнього отвору вихідної заготовки. Різниця даних

теоретичного моделювання і експериментального в цьому випадку становить 9...12 %. Виявлені закономірності аналогічні. Встановлені закономірності дають можливість встановити остаточний діаметр отвору труби.

Література

1. Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facets / Markov O., Zlygoriev V., Gerasimenko O., Hrudkina N., Shevtsov S. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, Issue 1 (95). P. 16–24. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142674>
2. Development of a new process for expanding stepped tapered rings / Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A., Kosilov M. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, Issue 1 (98). P. 39–46. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160395>
3. Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method / Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A. // *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. Issue 2. P. 52–60. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00877>
4. Sang B., Kang X., Li D. A novel technique for reducing macrosegregation in heavy steel ingots // *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210, Issue 4. P. 703–711. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.12.010>
5. Research on Charging Combination Based on Batch Weight Fit Rule for Energy Saving in Forging / Baiqing Z., Haixing L., Yifei T., Dongbo L., Yong X. // *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Vol. 2015. P. 1–9. doi: <https://doi.org/10.1155/2015/531756>
6. Strain function analysis method for void closure in the forging process of the large-sized steel ingot / Chen K., Yang Y., Shao G., Liu K. // *Computational Materials Science*. 2012. Vol. 51, Issue 1. P. 72–77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.011>
7. Wu Y., Dong X., Yu Q. Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. Vol. 93. P. 102–110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.01.012>
8. Sizek H. W. Radial Forging // *Metalworking: Bulk Forming*. 2005. P. 172–178. doi: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v14a.a0003984>
9. Ghaei A., Movahhedy M. R., Karimi Taheri A. Finite element modelling simulation of radial forging of tubes without mandrel // *Materials & Design*. 2008. Vol. 29, Issue 4. P. 867–872. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.03.013>
10. Fan L., Wang Z., Wang H. 3D finite element modeling and analysis of radial forging processes // *Journal of Manufacturing Processes*. 2014. Vol. 16, Issue 2. P. 329–334. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.01.005>
11. A vertical automated forging center for the plastic deformation of continuously-cast ingots / Burkin S. P., Korshunov E. A., Kolmogorov V. L., Babailov N. A., Nalesnik V. M. // *Journal of Materials Processing Technology*. 1996. Vol. 58, Issue 2-3. P. 170–173. doi: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)02146-9](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)02146-9)

12. Rotary Swaging Forming Process of Tube Workpieces / Zhang Q., Jin K., Mu D., Ma P., Tian J. // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 81. P. 2336–2341. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.330>
13. Determination of strain field and heterogeneity in radial forging of tube using finite element method and microhardness test / Sanjari M., Saidi P., Karimi Taheri A., Hossein-Zadeh M. // *Materials & Design*. 2012. Vol. 38. P. 147–153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.048>
14. Wang Z. G. The theory analysis and numerical simulation for the radial forging process of gun barrel // *Nanjing University of Science and Technology*. 2011. P. 28–30.
15. Latest Development in Railway Axle and Thick-Walled Tube forging on a Hydraulic Radial Forging Machine Type SMX / Knauf F., Nieschwitz P.-J., Holl A., Pelster H., Vest R. // 18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. Pittsburgh, 2011. P. 215–220.
16. Koppensteiner R., Tang Z. Optimizing Tooling And Pass Design For Effectiveness On Forged Product // 18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. Pittsburgh, 2011. P. 225–229.
17. Sheu J.-J., Lin S.-Y., Yu C.-H. Optimum Die Design for Single Pass Steel Tube Drawing with Large Strain Deformation // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 81. P. 688–693. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.061>
18. From Hollow Ingot to Shell with a Powerful Numerical Simulation Software Tool / Jaouen O., Costes F., Lasne P., Barbelet M. // 18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. Pittsburgh, 2011. P. 513–518.
19. Li Y., He T., Zeng Z. Numerical simulation and experimental study on the tube sinking of a thin-walled copper tube with axially inner micro grooves by radial forging // *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. Vol. 213, Issue 6. P. 987–996. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.12.002>
20. Comparison of radial forging between the two- and three-split dies of a thin-walled copper tube during tube sinking / Li Y., Huang J., Huang G., Wang W., Chen J., Zeng Z. // *Materials & Design (1980-2015)*. 2014. Vol. 56. P. 822–832. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.079>
21. Markov O. E., Oleshko M. V., Mishina V. I. Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighing More Than 100 Tons without Ingot Upsetting // *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. Vol. 3, Issue 7. P. 87–90. URL: <http://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/87Markov.pdf>
22. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation / Markov O. E., Perig A. V., Markova M. A., Zlygoriev V. N. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 83, Issue 9-12. P. 2159–2174. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>
23. Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling / Kukhar V., Burko V., Prysiashnyi A., Balalayeva E., Nyhnibeda M. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 3, Issue 7 (81). P. 53–61. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72063>

24. Markov O. E. Forging of large pieces by tapered faces // Steel in Translation. 2012. Vol. 42, Issue 12. P. 808–810. doi: <https://doi.org/10.3103/s0967091212120054>

25. Zhbakov I. G., Markov O. E., Perig A. V. Rational parameters of profiled workpieces for an upsetting process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 72, Issue 5-8. P. 865–872. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5727-5>

26. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state / Markov O. E., Perig A. V., Zlygoriev V. N., Markova M. A., Grin A. G. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 90, Issue 1-4. P. 801–818. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>